

基于叶绿素荧光峰特征的浑浊水体悬浮物浓度遥感反演*

周冠华^{1,2}, 杨一鹏³, 陈军^{4,5}, 李京²

(1: 北京师范大学资源学院, 北京 100875)

(2: 民政部/教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875)

(3: 中国环境监测总站, 北京 100029)

(4: 中国地质大学(北京), 北京 100083)

(5: 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

摘要: 内陆水体光学特性复杂, 其水质参数遥感反演是当前环境遥感研究的热点与难点. 2004年10月在太湖实测了67个站点的遥感反射率与相应站点水质参数浓度, 通过对水体反射率光谱的分析发现, 秋季太湖悬浮物主导了水体光学特性, 叶绿素荧光峰的特征主要体现为悬浮物浓度的变化. 据此建立了基于水面实测高光谱遥感反射率数据的叶绿素荧光峰特征与悬浮物浓度之间的拟合关系, 发现二者具有很好的响应关系. 具体分析了叶绿素荧光峰绝对高度、基线高度、归一化高度(分别归一化到560nm附近最大反射率波段与近红外810nm附近最大反射率波段)及荧光峰积分面积(包括积分总面积、基线以下面积与基线以上面积)等几种光谱特征与悬浮物浓度之间的关系, 其相关系数(R^2)分别为0.8822、0.7483、0.8901、0.8547、0.8927、0.8877、0.8632, 平均相对误差分别为27.25%、41.03%、27.11%、25.75%、24.91%、25.47%、27.54%. 总体反演精度较高, 其中总积分面积法效果最好, 基线高度法效果最差, 而叶绿素荧光峰波段的位移与悬浮物浓度之间不存在明显的相关性. 研究结果表明叶绿素荧光峰特征在浑浊内陆水体悬浮物浓度信息提取中具有很好的应用前景, 该方法可为浑浊的二类水体悬浮物遥感反演提供了一个新思路.

关键词: 水质遥感; 荧光峰; 悬浮物; 太湖; 高光谱

Inversion of total suspended matter concentration in turbid water based on the characteristic of chlorophyll fluorescence peak

ZHOU Guanhua^{1,2}, YANG Yipeng³, CHEN Jun^{4,5} & LI Jing²

(1: College of Resources Sciences and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, P.R.China)

(2: Academy of Disaster Reduction and Emergency Management Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, Beijing 100875, P.R.China)

(3: Environmental Monitoring Center of China, Beijing 100029, P.R.China)

(4: China University of Geosciences, Beijing 100083, P.R.China)

(5: Qingdao Marine Geosciences Institute, Qingdao 266071, P.R.China)

Abstract: The optical property of inland water is very complex, and inversion of water components concentration of inland water body is hotspot and difficulty problem in water quality remote sensing. The remote sensing reflectance and water qualities of 67 stations were acquired in the Lake Taihu in October, 2004. Basing on the characteristic spectral analysis, it was obvious that the water body spectral character in Lake Taihu in autumn was dominated by the total suspended matter (TSM). The properties of the chlorophyll fluorescence peak mainly reflect the variation of the concentration of TSM. Hereby, we established the relation between the properties of the chlorophyll fluorescence peak and the concentration of TSM based on *in-situ* remote sensing reflectance with 1nm bandwidth and water quality measurements. There were good response relationships between them. Making a concrete analysis of

* 国家科技支撑计划课题(2008BAC34B03)、国家自然科学基金(40871168)和中国博士后科学基金(20080440313)联合资助.
2008-10-31 收稿; 2008-12-03 收修改稿. 周冠华, 男, 1976年生, 博士后; E-mail: zhouguanhua@163.com.

the correlation relationship between the absolute height of fluorescence peak, the height above the reference baseline, the normalized height referred to the maximum reflectance about 560nm in green band and 810nm in infrared band, the integral area (including the total integral area, the integral area between the spectral curve and the reference baseline, the integral area below the reference baseline and the wavelength axis) and the concentration of TSM. Their correlation coefficients were 0.8822, 0.7483, 0.8901, 0.8547, 0.8927, 0.8877 and 0.8632 respectively, and the average relative error were 27.25%, 41.03%, 27.11%, 25.75%, 24.91%, 25.47% and 27.54% respectively. The inversion accuracy of the total integral area method is obvious better than the reference baseline height method. No outstanding correlation relationship between chlorophyll concentration and fluorescence peak position were found based on reflectance spectra. The results show that chlorophyll fluorescence properties are effective in detecting TSM concentration in turbid inland water body, which provide a new optional sensitive band to retrieval TSM concentration in complex waters.

Keywords: Water quality remote sensing; fluorescence peak; suspended matter; Lake Taihu; Hyperspectral remote sensing

水体中悬浮物含量是最重要的水质参数之一, 悬浮物不仅影响湖泊、河口冲淤变化过程, 同时还是各种营养盐和污染物的重要载体, 易引起水华等严重生态危机. 因此悬浮物的时空分布调查对于湖泊水质、生态环境的研究以及饮用水安全等方面都具有十分重要的意义.

常规调查方法是用船逐点采样、分析, 调查速度慢、周期长, 且只能获得在时间、空间分布上很离散的少量点的数据, 而河口湖岸地区水流情况复杂多变, 悬浮物含量的时空变化快, 这种在时空分布上离散的采样数据对比精度很差, 使得难于对大面积水域悬浮物含量的分布和变化有连续性的、同步的确切认识. 卫星遥感技术使这一状况得到了彻底改观, 采用定量遥感技术能迅速获得大面积水域含沙量信息, 瞬时同步性极好, 重复获取数据的周期短, 能有效地监测含沙量的时空分布特征.

如何利用遥感手段获取的水体光谱数据提取悬浮物的分布状况信息, 国内外许多学者进行了研究, 提出了众多的悬浮物遥感定量模式, 基本上可归纳为两种形式: (1)经验模型, 是在实验数据的基础上, 通过建立水体表观光学性质和水体组分浓度之间的定量关系, 即通过遥感数据与同步实测数据的统计相关分析, 建立二者之间的经验公式. 典型的经验算法包括线性模型、对数模型、Gordon模型^[1]、负指数模型^[2]以及统一模型^[3]等). 随着水色传感器多通道设置的实现, 更多的数学方法被引入到经验算法中, 逐渐发展了多元回归分析、非线性最优化法^[4]、主成分分析法^[5]、神经网络法^[6]和遗传算法^[7-8]等, 这些算法采用了多波段组合, 综合了更广光谱范围内的水体信号, 可提高二类水体悬浮物浓度的反演精度^[9]. (2)分析模型是以由辐射传输理论提出的上行辐射与水体中光学活性物质特征吸收与后向散射之间的关系为基础, 利用遥感反射比反演水体中各组分的总吸收系数与总后向散射系数, 并将其分别分解为各组分浓度与其单位吸收系数、单位后向散射系数的乘积之和, 从而反演水体中各组分浓度. 分析模型物理意义明确, 且具有普适性, 但仍存在一些假设和有待完善之处^[10], 理论计算与实际水体散射机制之间存在一定的差距, 以及一些水体光学参数测定方面的困难和准确性, 因此分析模型在实际应用中受到限制, 通常多采用水体光学理论模型简化后的半分析模型. 总体来说, 这些模型和方法是随着研究的深入, 不断向着定量化与模型化的方向发展.

本文针对内陆湖泊浑浊水体的光学特性, 根据叶绿素荧光峰的特征对悬浮物浓度的响应, 提出基于叶绿素荧光峰特征波段进行浑浊水体悬浮物浓度遥感反演的方法.

1 数据与方法

1.1 研究区与实验数据

本文以典型大型浅水湖泊——太湖为研究区, 于2004年10月20至29日在太湖均匀布设了67个试验点, 用GPS记录了每个采样点的经纬度信息, 测量了水面光谱数据与水质采样数据以及固有光学特性数据^[11], 采样点的空间位置如图1所示. 根据NASA SeaWiFS海洋光学测量规范^[12], 使用ASD公司生产的便携式地物波谱仪FieldSpec进行表观光学量的观测, 经处理后得到离水辐亮度、归一化离水辐亮度与遥感反射率. 为了消除不同时间测量光照条件差异的影响, 本研究采用遥感反射率. 实验中由于天气原因, 在48号点没有进行表观光学特性观测, 17号点的测量结果出现异常, 因此有效数据为65个采样点.

实验室内利用分光光度计法测定了叶绿素 a 浓度, 采用烘干称重法测定了悬浮物浓度, 其中, 叶绿素 a 的浓度范围为 $1.18\text{--}52.44\text{mg/m}^3$, 平均浓度为 14.08mg/m^3 ; 悬浮物浓度范围为 $3.10\text{--}169.47\text{mg/L}$, 平均浓度为 46.54mg/L . 表 1 列出了叶绿素 a 和悬浮物浓度数据的一些统计信息. 采样数据中叶绿素 a 和悬浮物浓度范围分布较宽, 且分布比较均匀; 67 个采样样品中包含了从低到高的各种叶绿素 a 和悬浮物浓度的水体, 能较好地代表整个湖区水体中这两种水质参数浓度分布变化范围. 此次水体样品能较好地代表太湖秋季水体的组成和分布特征.

表 1 实验数据统计结果

Tab.1 Statistical results of measurement data

项目	采样点	最小值	最大值	均值	标准差
叶绿素 a 浓度(mg/m^3)	67	1.18	52.44	14.08	8.94
悬浮物浓度(mg/L)	67	3.10	169.47	46.54	38.34

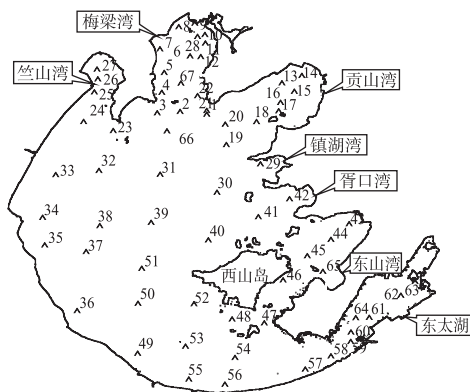


图 1 太湖采样点位置
(2004 年 10 月 20 日至 29 日)

Fig.1 Spatial distribution of sampling point locations(2004-10-20 to 2004-10-29)

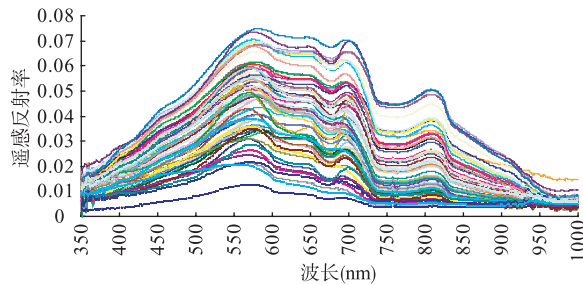


图 2 太湖实测遥感反射率光谱
(2004 年 10 月 20 日至 29 日)

Fig.2 Remote sensing reflectance of Lake Taihu (2004-10-20 to 2004-10-29)

1.2 研究方法

水体光谱特性是水体信息提取与水质参数遥感反演的物理基础. 自然水体中污染物质的吸收和散射作用使水体反射光谱呈现不同的形态. 前人研究表明含沙水体反射光主要是水中悬浮泥沙散射的结果, 其强度与悬浮泥沙颗粒有关, 是悬浮泥沙浓度、粒径大小、种类与形状等参数的函数. 在可见光与近红外波段范围, 随着悬浮泥沙浓度的增加, 水体的反射率增大, 且反射峰位置向长波方向移动, 反射峰形态变宽; 当水体中的含沙量近于饱和时, 水面光谱反射曲线也接近于泥沙本身的光谱特性; $700\text{--}900\text{nm}$ 范围反射率对悬浮泥沙浓度敏感, 是遥感悬浮泥沙的常用波段. 秋季太湖悬浮物的成分以悬浮泥沙为主, 同时还伴随大量的浮游植物腐烂分解的有机碎屑, 文中统称为悬浮物. 本文针对内陆水体光学特点, 旨在挖掘悬浮物遥感的有效波段.

内陆水体通常悬浮物浓度高, 富营养化严重. 从太湖实测的高光谱数据(图 2)可以看出, 水体光谱曲线呈现典型的内陆水体光谱特征. 叶绿素荧光通常认为是二类水体叶绿素 a 的重要指示, 它近似遵循高斯正态分布, 其高度同叶绿素 a 的浓度有关. 随着叶绿素 a 浓度的增加, 荧光峰逐渐增高. 不仅如此, 荧光峰随叶绿素 a 浓度的变化还会出现“红移现象”——在荧光峰增高的同时伴随着峰值位置朝红外方向移动^[13]. Gitelson^[14]对“红移现象”的多年研究表明, 当叶绿素 a 浓度小于 3mg/m^3 时, 荧光峰的位置大致在 683nm 处; 当叶绿素 a 浓度增加至 10mg/m^3 时, 荧光峰缓慢移到 685nm 处; 而当叶绿素 a 浓度达到 100mg/m^3 时, 荧光峰已在 700nm 处; 达到 300mg/m^3 时, 荧光峰到达 705nm 甚至更远. 本实验数据的叶绿素 a 浓度范围为 $1.18\text{--}52.44\text{mg/m}^3$ (表 1), 荧光峰的波段范围大体在 $690\text{--}700\text{nm}$ 之间(图 3), 与 Gitelson^[14]

的研究一致。

由于叶绿素荧光位于红光波段, 受大气中气溶胶吸收的影响很小, 通常认为叶绿素荧光峰只携带叶绿素的信息, 受悬浮物和黄色物质的影响较小, 有利于叶绿素a浓度的直接反演。图3与图4分别给出了太湖叶绿素a浓度与叶绿素荧光率峰位置及峰值大小的关系, 从这两个散点图可以看出, 当叶绿素a浓度增加时, 荧光峰峰值整体往长波方向移动, 叶绿素a浓度与叶绿素荧光峰位置具有一定程度的正相关性, 而叶绿素a浓度与叶绿素荧光峰高度相关性却不显著。由此表明除了叶绿素a外, 在该特征波段, 水体的光谱特性受其它水体组分的影响非常大。同时由太湖水体遥感反射率光谱曲线(图2)近红外波段的高反射率可以看出, 当时太湖悬浮物的浓度非常高。从实验数据的统计结果(表1)可以看出, 悬浮物的平均浓度为46.54mg/L, 而最大浓度达到了169.47mg/L, 而叶绿素a的平均浓度只有14.08mg/m³, 并没有呈现严重的富营养化状态。另外, 由当时现场实验测量的先验知识可知, 水体非常混浊。由此可以推断, 当时太湖水体的光学特性由悬浮物所主导, 叶绿素a的光学特性受悬浮物所抑制, 高浓度的悬浮物湮没了叶绿素荧光峰对其浓度的响应。因此对于这种浑浊水体, 由于受悬浮物的严重干扰, 叶绿素荧光峰对叶绿素浓度并不具备良好的指示作用, 直接基于荧光峰特征很难有效地提取叶绿素a浓度。而通过对实验数据的统计分析发现, 叶绿素荧光峰的特征对悬浮物浓度变化却具有很好的响应。本文基于叶绿素荧光峰绝对高度、基线以上峰值高度、归一化荧光高度与积分面积等特征分别探讨其与悬浮物浓度之间的相关关系, 并建立相应的定量反演模型, 实现悬浮物浓度的有效反演。

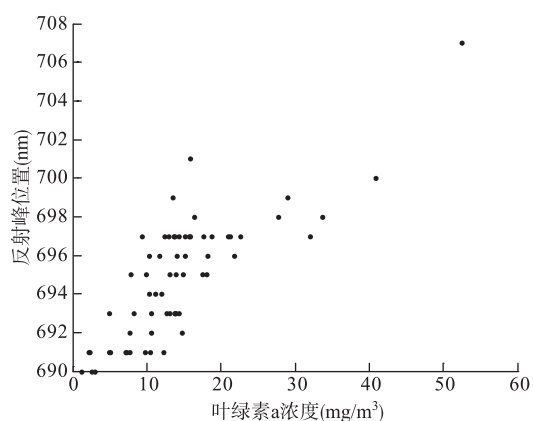


图3 叶绿素a浓度与叶绿素荧光峰位置的关系

Fig.3 Chl.a concentration vs. the reflectance peak near 700nm

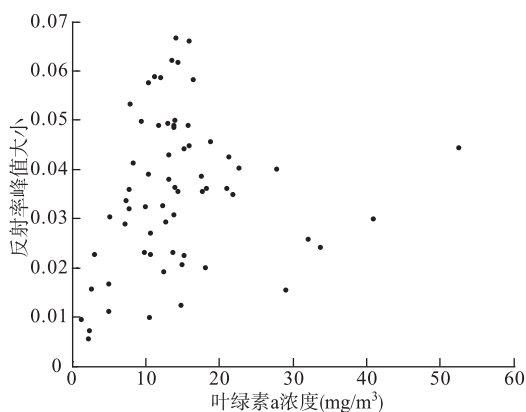


图4 叶绿素a浓度与叶绿素荧光峰反射率峰值大小的关系

Fig.4 Chl.a concentration vs. the reflectance peak magnitude near 700nm

2 结果与讨论

下面基于实验数据分析叶绿素荧光峰特征与悬浮物浓度之间的响应关系。

2.1 叶绿素荧光峰高度(值绝对大小)与悬浮物之间的相关性

基于65个站点的有效测量数据进行分析, 由图5可以看出, 随着悬浮物浓度的升高, 叶绿素荧光峰的高度也显著地增加, 二者具有良好的指数关系, $R^2=0.8822$, 平均相对误差为27.25%, 其中平均相对误差的计算公式为:

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1, N} \left| \frac{x_i^e - x_i^m}{x_i^m} \right| \quad (1)$$

其中, N 为样本数, x^e 为模型估算值, x^m 为实测值。

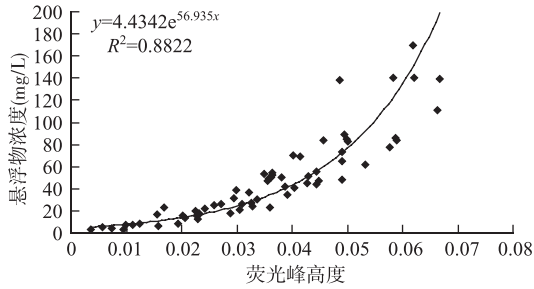


图5 叶绿素荧光峰高度与悬浮物浓度之间的关系

Fig.5 The concentration of TSM(total suspended matter) vs. the height of fluoresce peak

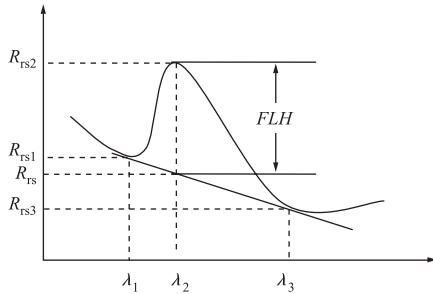


图6 荧光峰高度的基本原理

Fig.6 The principle of fluorescent line height

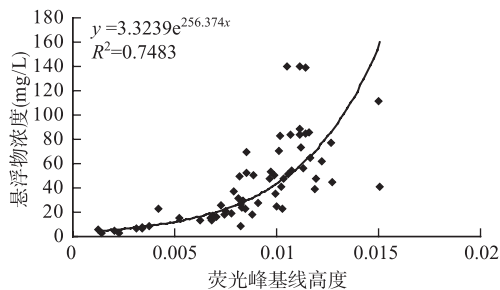


图7 叶绿素荧光峰基线高度与悬浮物浓度之间的关系

Fig.7 The concentration of TSM vs. fluoresce height above baseline

2.2 荧光峰值的基线高度与悬浮物之间的相关性

叶绿素荧光峰高度的表征方法除了上述的绝对高度外,还有一种是荧光基线高度法(Fluoresce Line Height, FLH),其通用算法基于三个波长,其中之一的中心波长为叶绿素荧光的极大值(685nm 附近,随水体组分浓度不同而变化),其余两个基线波段分别位于荧光峰的两侧(图 6)。荧光峰基线高度(FLH)的计算方法如下:

$$FLH = R_{rs2} - \left(R_{rs3} + \frac{\lambda_3 - \lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_1} (R_{rs1} - R_{rs3}) \right) \quad (2)$$

其中, λ_1, λ_3 分别为荧光峰的左右两个基线波段, λ_2 为荧光峰波段, $R_{rs1}, R_{rs2}, R_{rs3}$ 分别为各波段对应的遥感反射比。

将荧光峰基线高度与悬浮物浓度进行相关分析(图 7),发现二者也具有显著的相关性, $R^2=0.7483$,平均相对误差为 41.03%,这完全不同于 Gower 等^[15]对海洋水体的研究结论“悬浮物虽然使水体的辐射光谱升高,但基线以上的荧光高度基本不随悬浮物浓度发生变化”。当然,效果明显比荧光峰绝对高度对悬浮物浓度的响应要差,说明随悬浮物浓度的增加,反射光谱曲线主要是表现为整体的抬升,而不只是叶绿素荧光峰的增强。

2.3 归一化荧光高度与悬浮物浓度之间的相关性

定量描述荧光峰峰高的另一种方法是归一化荧光高度法(Normalized Fluorescence Height, NFH), Giteson 等^[16]将荧光峰波段(文中表示为 f_{max})的遥感反射率除以位于绿光区域 560nm 附近整条光谱曲线的最大反射率波段(文中表示为 560_{max})或荧光峰左侧 675nm 附近的最小反射波段(文中表示为 675_{min}),得到归一化的荧光高度,即 $NFH=R_{f_{max}}/R_{560_{max}}$ 或 $NFH=R_{f_{max}}/R_{675_{min}}$ 。为了描述荧光峰与悬浮物之间的定量关系,本文分别将荧光峰归一化到绿光区域 560nm 附近的最大反射率波段及近红外区域 810nm 附近的最大反射率波段(文中表示为 810_{max}),这两个波段分别对悬浮物的浓度敏感。据此,建立了归一化荧光高

度与悬浮物浓度的关系(图 8, 图 9),其中 $R_{f_{max}}/R_{560_{max}}$ 和 $R_{f_{max}}/R_{810_{max}}$ 与悬浮物浓度的相关系数(R^2)分别为 0.8901 与 0.8547,平均相对误差分别为 27.11%与 25.75%。以 560nm 附近最大反射率波段作为参考波段与以 810nm 附近最大反射率波段作为参考波段相比,前者拟合系数更高,而平均相对误差较大。近红外波段 810nm 附近的波峰高度直接反映的是水体组分后向散射系数的大小,而后向散射系数对悬浮颗粒物非常敏感,与悬浮物浓度具有较好的相关性^[17],而 560nm 波段区域还受水体中非悬浮物的影响,因此,选择近红外 810nm 附近的反射峰波段作为参考波段,对于悬浮物的估算效果更好。

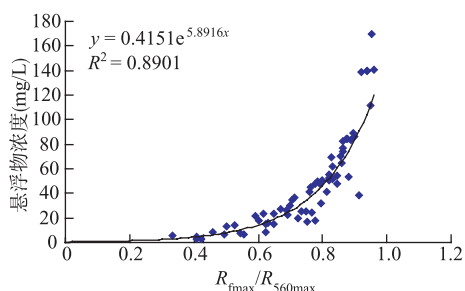


图 8 R_{fmax}/R_{560max} 与悬浮物浓度之间的关系
Fig.8 The concentration of TSM vs. R_{fmax}/R_{560max}

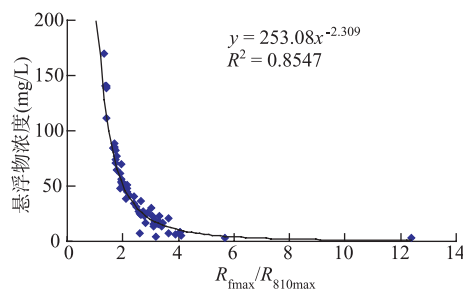


图 9 R_{fmax}/R_{810max} 与悬浮物浓度之间的关系
Fig.9 The concentration of TSM vs. R_{fmax}/R_{810max}

2.4 荧光峰积分面积与悬浮物之间的相关性

光谱积分也是光谱特征参量化的重要形式, 分别将荧光峰与波长坐标轴之间的区域对基线波段之间的波长进行积分及荧光峰与基线之间的区域对波长进行积分, 分析二者与悬浮物浓度之间的关系(图 10, 图 11). 前者的相关系数达到 0.8927, 平均相对误差为 24.91%, 后者的相关系数为 0.8632, 平均相对误差为 27.54%. 将荧光峰基线以下梯形面积与悬浮物浓度的相关系数为 0.8877, 平均相对误差为 25.47%(图 12). 由此可见, 对于浑浊的内陆水体, 利用叶绿素荧光峰积分面积也可以有效地反演悬浮物浓度.

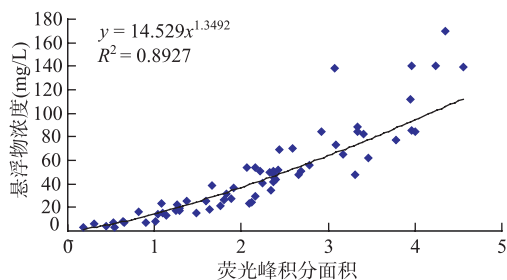


图10 叶绿素荧光峰积分总面积与悬浮物浓度之间的关系
Fig.10 The concentration of TSM vs. the total integral area

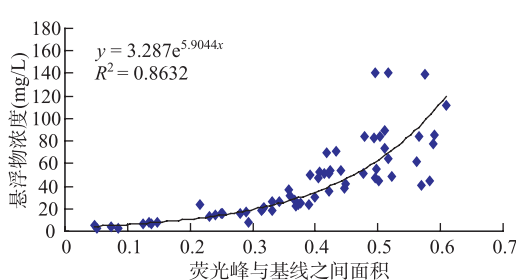


图11 荧光峰与基线之间面积与悬浮物浓度之间的关系
Fig.11 The concentration of TSM vs. the integral area above reference baseline and below the reflectance

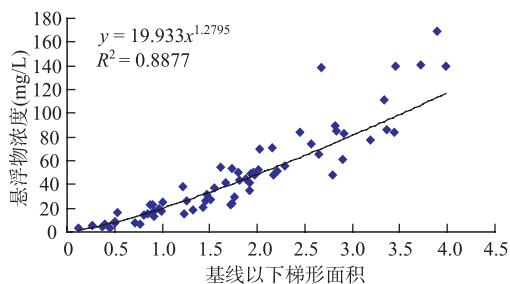


图12 叶绿素荧光峰基线以下梯形面积与悬浮物浓度之间的关系
Fig.12 The concentration of TSM vs. total area below the reference baseline

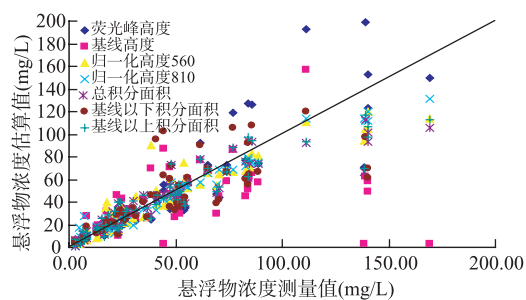


图 13 几种模型估算结果比较
Fig.13 Comparison of estimation results and measurement results of different models

2.5 估算模型对比

将上述几种模型的估算效果进行对比(表 2), 总体说来, 这几种模型都能有效地实现悬浮物浓度的遥感反演. 同时, 从这几种模型的测量值与估算值的散点图(图 13)可以看出, 所有的反演模型都在中低浓度时估算效果好, 而在高浓度时效果偏差, 相关系数与平均相对误差具有很好的一致性. 比较而言, 虽然荧光峰基线高度法效果偏差, 相关系数为 0.7483, 平均相对误差为 41.03%, 但荧光峰基线高度与悬浮物浓度之间仍存在显著的相关性, 而通常的认识是叶绿素荧光峰是叶绿素固有的光学特性, 与悬浮物之间理应不存在很强的相关性. 由前文可知, 叶绿素 a 浓度与荧光峰高度缺乏必然的相关性(图 4). 因此, 我们必须改变传统海洋光学对叶绿素 a 荧光峰特性的认识. 由于内陆水体组分多样, 光学特性非常复杂, 水体组分之间存在复杂的耦合机制, 因此表现出与海洋光学明显不同的光学性质.

相对来说, 荧光峰总积分面积效果最好, 相关系数为 0.8927, 平均相对误差为 24.91%; 其它几种模型的相关系数都在 0.85-0.9 之间, 其中, 基于 2 个参考波段的归一化荧光高度法, 整体估算效果较好, 只有少数在极高浓度时, 估算值偏低. 说明随着悬浮物浓度的升高, 叶绿素荧光峰波段反射率也相应变大, 二者呈正相关关系, 但当悬浮物浓度足够高时, 水体中的悬浮物浓度趋于饱和, 湮没了叶绿素荧光对悬浮物浓度变化的响应.

由 3 种积分面积法的估算效果(用相关系数与平均相对误差衡量)对比可以看出, 荧光峰总积分面积法>基线以下梯形面积法>基线以上曲线积分面积法, 这与三者的面积相对大小具有一致性. 由水体反射率光谱曲线(图 2)可以看出, 基线以下梯形面积通常情况下都大于基线以上曲线积分面积, 尤其是当悬浮物浓度较高时, 前者远远大于后者. 这可解释为总积分面积综合了两个参考波段之间所有波长的信息, 而梯形面积法只利用了两个参考波段的信息, 曲线积分面积尽管也利用了两个参考波段之间的所有波段信息, 但是无法体现参考波段反射率随悬浮物浓度的响应. 荧光峰高度法只利用了单一特征波段的信息, 因此面积法在通常情况下要比高度法效果要好.

尽管基于荧光峰总积分面积法具有最好的拟合效果与平均相对误差, 但通常海洋水色卫星传感器涵盖叶绿素荧光峰区域的波段较宽, 难以达到水面高光谱 1nm 的分辨率, 曲面积分误差较大, 会影响积分面积与悬浮物浓度之间的相关性, 因此该算法适合于高光谱传感器的应用, 而荧光峰绝对高度法或归一化荧光高度法, 简单易行, 具有很好的可操作性, 目前水色卫星传感器通常都设有荧光峰波段, 是浑浊水体悬浮物遥感反演很好的选择方案.

表 2 几种估算模型的参数与效果比较

Tab.2 Comparison of estimation results and models parameters

模型	波段选择	R^2	平均相对误差(%)
荧光峰高度	荧光峰波段	0.8822	27.25
荧光峰基线高度	荧光峰波段、2 基线波段	0.7483	41.03
归一化荧光高度	荧光峰波段、560max(810max)	0.8901(0.8547)	27.11(25.75)
荧光峰总积分面积	左基线波段—右基线波段	0.8927	24.91
基线以下梯形面积	左基线波段—右基线波段	0.8877	25.47
基线以上积分面积	左基线波段—右基线波段	0.8632	27.54

3 结论

海洋光学特性的一般性认识与规律, 在内陆水体应用中可能失效. 内陆水体光学特性非常复杂, 区域性强, 因此必须根据区域性水体特性, 选择适合该区域的遥感特征波段与遥感反演算法. 对于内陆湖泊等典型的二类水体, 由于悬浮物与黄色物质的增多, 悬浮物的后向散射与黄色物质的强烈吸收直接影响了水体的光学性质, 导致水色遥感反演复杂化. 通常认为叶绿素的荧光峰的位置和高度是叶绿素 a 浓度的指示, 荧光波段是二类水体叶绿素遥感反演的重要通道. 但对于浑浊的内陆湖泊水体——如秋季太湖, 悬浮物浓度极高, 而叶绿素 a 浓度相对较低, 叶绿素荧光峰特征与其浓度缺乏足够的响应, 而荧光峰

的高度(包括绝对高度、基线高度与归一化高度)、积分面积与悬浮物浓度之间具有良好的响应,成为悬浮物浓度的敏感波段。通过本研究可以发现,叶绿素荧光波段可为浑浊的二类水体悬浮物的监测提供一条新的途径。

4 参考文献

- [1] Brown OB, Jacobs MM. Computed Relationships between the Inherent and Apparent Optical Properties of a Flat Homogenous Ocean. *Applied Optics*, 1975, **14**(2): 417-427
- [2] 李 京. 水域悬浮泥沙固体含量的遥感定量研究. *环境科学学报*, 1986, **6**(2): 166-173.
- [3] 黎 夏. 悬浮泥沙遥感定量的统一模式及其在珠江口中的应用. *环境遥感*, 1992, **7**(5): 106-113.
- [4] Maritorea S, Siegel DA, Peterson AR. Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications. *Applied Optics*, 2002, **41**(15): 2705-2714.
- [5] Neumann A, Krawczyk H, Walzel T. A complex approach to quantitative interpretation of spectral high resolution imagery. Third Thematic Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, Seattle, USA, 1995: II-641-II-652.
- [6] Schiller H, Doerffer R. Neural Network for Emulation of an Inverse Model-Operational Derivation of Case II Water Properties from MERIS data. *Int Journal of Remote Sensing*, 1999, **20**(9): 1735-1746.
- [7] Chami M, Robilliard D. Inversion of oceanic constituents in Case I and II waters with genetic programming algorithms. *Applied Optics*, 2002, **41**(30): 6260-6275.
- [8] 詹海刚, 施 平, 陈楚群. 基于遗传算法的二类水体水色遥感反演. *遥感学报*, 2004, **8**(1): 31-36.
- [9] 王 繁. 河口水体悬浮物固有光学性质及浓度遥感反演模式研究[博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [10] Phinn SR, Dekker AG, Brando VE *et al.* Mapping water quality and substrate cover in optically complex coastal and reef waters: an integrated approach. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, **51**: 459-469.
- [11] Ma R, Tang J, Dai J *et al.* Absorption and scattering properties of water body in Lake Taihu, China: absorption. *Inter Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**(19): 4277-4304.
- [12] Mueller JL, Austin RW eds. Ocean optics protocols for SeaWiFS validation. NASA Technical Memorandum 104566. Greenbelt, MD, NASA Goddard Space Flight Center, 1995.
- [13] 赵冬至, 丛王福. 渤海叉角藻赤潮的光谱特征研究. 渤海赤潮灾害监测与评估研究文集. 北京: 海洋出版社, 2000.
- [14] Gitelson AA. Algorithms for remote sensing of phytoplankton pigments in inland waters. *Adv Space Res*, 1993, **13**: 197-201.
- [15] Gower JFR. Observation of *in Situ* Fluorescence of Chlorophyll-a in Saanich Inlet. *Boundary-Layer*, 1980, **18**: 235-245.
- [16] Gitelson A. The peak near 700nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration. *Inter Journal of Remote Sensing*, 1992, **13**(17): 3367-3373.
- [17] 宋庆君, 马荣华, 唐军武等. 秋季太湖悬浮物高光谱估算模型. *湖泊科学*, 2008, **20**(2): 196-202.